## 時間分解磁気光学カー効果による低磁場下での

## 垂直磁化 CoFeB 薄膜の磁化歳差ダイナミクス評価

佐々木 悠太, 杉本 聡志, 葛西 伸哉, 温 振超, 三谷 誠司, 高橋 有紀子 (NIMS)

All-optical time-resolved magneto-optical Kerr effect measurement for perpendicularly magnetized CoFeB thin films at relatively low magnetic fields Y. Sasaki, S. Sugimoto, S. Kasai, Z. Wen, S. Mitani, Y. K. Takahashi (NIMS)

## <u>はじめに</u>

磁気抵抗ランダムアクセスメモリ(MRAM)は信頼性の高い不揮発性メモリ素子として注目されており,近 年市場に投入され始めている.[1] 大きなトンネル磁気抵抗比と垂直磁気異方性,小さなダンピング定数を有 しているため垂直磁化 CoFeB (p-CoFeB)薄膜が強磁性金属層に用いられている.[2] p-CoFeB 層の磁気特性に よって素子の熱安定性や磁化反転時の電流密度が変化するため,プロセス JP0083 インフォマティクスの観点 から垂直磁気異方性とダンピング定数をウエハーサイズで評価することが重要となる.超短パルスレーザー を用いた全光学的時間分解磁気光学カー効果(AO-TRMOKE)は数 100 GHz の磁化歳差ダイナミクスを測定で きるため大きな磁気異方性を有する磁性薄膜の評価に適している.[3] また,微細加工が不要で非接触計測で あるためウエハーサイズの試料評価が可能である.一方,p-CoFeB 薄膜の磁化ダイナミクスについて生産ライ ンでも利用可能な低磁場計測に関する知見が少ない.本研究では,異なる磁気特性のp-CoFeB 薄膜において, 低磁場で TRMOKE 計測を行い磁気異方性やダンピング定数の相対評価について検討した.

## <u>実験方法</u>

熱酸化 Si 基板上にマグネトロンスパッタ法を用いて試料を作製した. 薄膜構成は基板側から, Sample A: Ta(3)/MgO(1.3)/ CoFeB(1.30)/ W(0.3)/ Ta(3), Sample B: Ta(3)/MgO(1.3)/ CoFeB(1.43)/ W(0.3)/ Ta(3), Sample C: Ta(5)/MgO(1.3)/ CoFeB(1.20)/ Ta(3), and Sample D: Ta(3)/MgO(1.3)/CoFeB(1.40)/W(0.3)/Ta(3) (膜厚単位 nm)であ る. SampleA, B は熱処理温度 *T*<sub>a</sub>=350°C, SampleC, D は *T*<sub>a</sub>=300°C で製膜後に真空中で熱処理した. TRMOKE 測 定用の光源には中心波長 1030 nm, 繰り返し周波数 10 kHz, パルス幅 230 fs の Yb:KGW レーザーを用いた.

#### <u>実験結果</u>

図 1(a)に Sample A について磁場角度を膜面垂直方向に対して  $\theta_{H}=60^{\circ}$ とした際の TRMOKE 測定結果を示す.低磁場下で明瞭な 磁化歳差信号が得られている.図 1(b)に実効的なダンピング定数  $\alpha_{eff}$ について試料の実効的な垂直磁気異方性磁場 $\mu_0H_k^{eff}$ に対してプ ロットした結果を示す.磁場が大きくなるに伴い $\alpha_{eff}$ の値は小さ くなり intrinsic な値に近づいている.一方で,各試料間の相対的な 大小関係は磁場に依存しないことが分かる.このことから,プロ セスインフォマティクスで重要となる相対評価方法として低磁場 TRMOKE 測定が有効であることが示唆された.

本研究の一部は文部科学省の卓越研究員事業(JPMXS0320230 032)および池谷科学技術振興財団の支援を受けて行われた.

#### <u>参考文献</u>

[1] T. Schenk, *et al.*, Rep. Prog. Phys. **83**, 086501 (2020).
[2] K. Nishioka, *et al.*, IEEE Transactions on Electron Devices **68**, 2680-2685 (2021).
[3] S. Iihama, *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 174416 (2014).



図 1. (a)Sample A について磁場角度 θ<sub>H</sub>=60<sup>o</sup> とした際の TRMOKE 測定結 果. (b)実効的なダンピング定数 α<sub>eff</sub>の 試料依存性.

## Co-Pd 合金薄膜における円偏光誘起トルク

## <sup>○</sup>抜井康起<sup>1,2,\*</sup>、飯浜賢志<sup>3</sup>、石橋一晃<sup>1,2</sup>、水上成美<sup>2,4</sup> (<sup>1</sup>東北大工、<sup>2</sup>東北大 AIMR、<sup>3</sup>名大工、<sup>4</sup>東北大 CSIS)

## Circularly-polarized-light induced torque in Co-Pd alloy films Koki Nukui<sup>1,2</sup>, Satoshi Iihama<sup>3</sup>, Kazuaki Ishibashi<sup>1,2</sup>, Shigemi Mizukami<sup>2,4</sup>

(1Dept. of Appl. Phys., Tohoku Univ., 2WPI-AIMR, Tohoku Univ., 3Dept. of Mater. Phys., Nagoya Univ., 4CSIS, Tohoku Univ.)

#### 1. はじめに

光による磁化の制御は、その高速性からレーザーアシスト磁気記録や光書き込み型のスピントロニクス メモリへの応用が期待され、基礎的な研究が精力的に行われている[1]。光と磁性体(磁化)の相互作用にお いて注目を集めているのが円偏光から磁性体に注入される角運動量の寄与である[2]。円偏光が物質中に角運 動量を生成する効果としては、逆ファラデー効果[3]やオプティカルオリエンテーション[4]が知られている。 しかしながら、生成される角運動量がスピン角運動量なのかあるいは軌道角運動量かの議論はあまりなく、 その物理の理解は進んでいない。最近我々は、Co-Pt 合金薄膜における円偏光誘起トルクを調べ、円偏光によ って合金中に誘起される軌道角運動量の寄与を議論した[5]。物理の理解をさらに深めるべく、本研究では Co-Pd 合金薄膜における円偏光誘起トルクについて調べた。

#### 2. 実験方法

超高真空マグネトロンスパッタリング法により、熱酸化膜付き のSi基板上に厚み5nmのCo<sub>1-x</sub>Pd<sub>x</sub>(x=0-0.8)合金薄膜を製膜し た。コスパッタ法によりPd組成xを0から0.8まで系統的に変化 させた。ポンププローブ法に基づく時間分解磁気光学カー効果 (TRMOKE)により、円偏光のポンプ光によって発生する磁化歳差 運動をプローブ光の磁気光学カー効果で評価した(図1)。その際、 薄膜面内に20 kOeの外部磁場を印加した。

#### 3. 実験結果

右回り円偏光(RCP)と左回り円偏光(LCP)のポンプ光を 照射した際にヘリシティによって反転する磁化歳差運動 のシグナルを観測した。この2つのシグナルの差分を取る ことで、円偏光によって誘起される磁化ダイナミクスを抽 出し、減衰正弦波関数を最小二乗フィットすることで、磁 化歳差運動に伴うカー回転角の振動振幅Aと位相々を求め た(図2)。Pd組成xの増大とともに振幅と位相の増大が観 測されたが、それらの変化はCo-Pt薄膜に比較し小さいこ とが分かった。講演ではより詳細なデータを示しつつ、円 偏光誘起トルクの物理について議論する。

本研究は、科研費補助金(No. 21H05000)、JST さきがけ (No.JPMJPR22B2)、旭硝子財団、村田学術振興財団、東北 大学 X-NICS、東北大学 GP-spin の支援のもと行われた。

## 参考文献

- [1] H. Becker, et. al., IEEE J. Sel. Top Quant. Electron. 26, 1-8 (2019).
- [3] G.-M. Choi, et. al., Nat. Commun. 8, 15085 (2017).
- [5] K. Nukui, et. al., arXiv: 2405.07405.



図 1 円偏光誘起磁化ダイナミクス測定の概略図



図 2 Co 薄膜における円偏光のヘリシティに依存した 磁化ダイナミクス測定の例。曲線は実験値にフィット しており、その cos と sin の成分も併せて示す。

[2] C.-H. Lambert, *et. al.*, Science **345**, 1337–1340 (2014).
[4] P. Němec, *et. al.*, Nat. Phys. **8**, 411–415 (2012).

# プラチナ薄膜における円偏光レーザーパルス誘起テラヘルツ波放射

石橋一晃<sup>1,2</sup>, 飯浜賢志<sup>3</sup>, 抜井康起<sup>1,2</sup>, 水上成美<sup>2,4</sup> (1.東北大工, 2. 東北大 AIMR, 3. 名古屋大工, 4. 東北大 CSIS)

Circularly-polarized laser pulse-induced terahertz emission in Pt thin film K. Ishibashi<sup>1,2</sup>, S. Iihama<sup>2,3</sup>, K. Nukui<sup>1,2</sup>, and S. Mizukami<sup>2,4</sup>
(1. Dept. of Appl. Phys., Tohoku Univ., 2. WPI-AIMR, Tohoku Univ., 3. Dept. of Mater. Phys., Nagoya Univ., 4. CSIS, Tohoku Univ.)

### <u>はじめに</u>

フォトンから電子系へのスピン角運動量の転写は、光による磁化制御やレーザー誘起テラヘルツ波放射の 観点から精力的な研究が行われている[1,2]。近年、ビスマス(Bi)薄膜において円偏光誘起ヘリシティ依存テラ ヘルツ波放射が報告された[2,3]。観測された現象は、フォトンから電子系へのスピン角運動量の転写と逆ス ピンホール効果による効果として議論されており、Biのトポロジカルな性質が効果を増大させている可能性 がある。Bi以外の他のスピンホール角の大きい重金属においても同様のテラヘルツ波放射現象が期待される が、そのような報告はこれまでない。本発表ではスピンホール角が大きいプラチナ(Pt)薄膜に着目し、初めて 円偏光誘起テラヘルツ波放射の観測に成功した結果について報告する。

## <u>実験方法</u>

超高真空スパッタリング法により Pt 薄膜をガラス基板上に製膜した。試料表面に円偏光を45度の角度で 入射し、発生するテラヘルツ波をテラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) [4]によって検出した。レーザー光源に は波長 800 nm、パルス幅 120 fs、繰り返し周波数 5 kHz のチタンサファイアフェムト秒レーザーを使用した。

#### 実験結果

図1にPt薄膜で観測された代表的な円偏光誘起テラヘルツ 波放射のデータを示す。ここで、黒塗りと白抜きのプロットは それぞれ+と一のヘリシティσを有する円偏光を照射した際の シグナルである。円偏光のヘリシティ±σを変えるとテラヘル ツ波シグナルの符号(位相)が反転することが見て取れ、Pt薄 膜においても、Biと同様の円偏光依存テラヘルツ波放射が観測 可能であることを示している。講演では詳細なデータを示し、 ヘリシティ依存テラヘルツ波放射の物理的起源について議論す る。

本研究は、科研費補助金(No. 21H05000)、JSPS 科研費(No. 22J22178)、JST さきがけ(No. JPMJPR22B2)、旭硝子財団、村田 学術振興財団、東北大学 X-NICS、東北大学 GP-spin の支援のも と行われた。



図1.Pt 薄膜における円偏光誘起テラヘル ツ波放射。黒塗り及び白抜きのプロットは、 それぞれ+、一のヘリシティを有する円偏 光を照射した際のシグナルを示す。

#### <u>参考文献</u>

[1] S. Iihama, *et al.*, J. Appl. Phys. **131**, 023901 (2022).
[2] Y. Hirai, *et al.*, Phys. Rev. Appl. **14**, 064015 (2020).
[3] K. Ishibashi, *et al.*, Phys. Rev. B **107**, 144413(2023).
[4] R. Mandal *et al.*, NPG Asia Mater. **16**, 1 (2024).

## GdFeCo/Fe 薄膜での単一超短パルス光照射による反転磁区形成

吉川大貴, 笠谷雄一, 塚本新 (日本大学理工学部)

## The magnetic domain switching by single shot ultrafast laser pulse on GdFeCo/Fe thin film Hiroki Yoshikawa, Yuichi Kasatani and Arata Tsukamoto (College of Science and Technology, Nihon Univ.)

はじめに GdFeCo 薄膜では数十フェムト秒の超短パルス光を単パルス照射することで、全光型磁化反転現象(All – Optical magnetization Switching: AOS)を誘起することが可能である。更に AOS は円偏光に対応した 形成磁区制御が可能なことからも、超高速な光駆動型のスイッチングデバイスの基本原理への応用も期待さ れる。我々はこれまでに超短パルス光入射後に時間発展する電子系の非平衡温度分布の観点から種々の GdFeCo 薄膜の積層構造依存性から電子比熱と金属体積に着目をして AOS 現象の原理と誘起条件につき検討 を進めた<sup>1)</sup>。本報告ではさらに副格子磁化体積の異なる試料を作製し、副格子磁化と AOS 現象の関係につき 実験的検討を行う。

**実験方法** マグネトロンスパッタで作製した SiN(60 nm) / Gd<sub>27</sub> Fe<sub>63.9</sub> Co<sub>9.1</sub> (10 nm) / {A:SiN or B:Cu or C:Pt or D:Fe (5 nm)}/ glass sub.の垂直 磁化 GdFeCo 薄膜に、直線偏光かつ中心波長 800 nm パルス幅 90 fs(半 値全幅)のガウシアンレーザー光を膜面側より照射することにより 室温にて磁化反転を誘起し、形成磁区を偏光顕微鏡像にて観察した。

磁区形成観察結果 Sample A~C において、Gd<sub>25</sub> Fe<sub>65.6</sub> Co<sub>9.4</sub> (10 nm)/ {SiN or Cu or Pt (5 nm)} 試料における既報告<sup>2)</sup>と同様に、Fig. 1 に示 す AOS 形成磁区を確認した。一方、同じ照射光強度条件では Sample Dの Fe (5nm)を隣接する GdFeCo 薄膜では AOS 形成磁区を確認する ことはできなかった。ただし、照射光強度を AOS 閾値の約 3 倍まで 増加させた際に反転磁区が形成されることを確認した。そして、こ の形成磁区が AOS 現象に基づく磁区形成であるか判別するために、 照射位置を反転形成磁区の半分程度移動し二度目の照射により反転 磁区形成を行った (Fig. 2)。結果として直線偏光照射における AOS 現象で期待される照射前磁区パターンに対する一意な反転パターン は出現せず、熱磁区形成<sup>1)</sup>に類する磁区形成が観察された。以上の ように Sample D (GdFeCo/Fe) においては AOS 現象による磁区形成を

これに対し、まず Sample D が金属層膜厚 10 nm の Sample A に比べ 金属層膜厚が 1.5 倍厚く、電子温度上昇率の低下により、AOS 現象 が生じにくくなっているものと考えられる。しかし、Sample D と同 等に 15nm の金属層膜厚を有する Sample B, C では AOS 磁区形成が行 Irradiation Power



A: SiN B: Cu C: Pt D: Fe Fig. 1 The created magnetic domain images on each samples (A~D)



HI-AOS Domains on Sample A on Sample D Fig. 2 The difference between the created domain on Sample D and HI-AOS domain

われており、更に先行研究における金属磁性層 GdFeCo 膜厚が 10nm~30nm の試料において、いずれの膜厚で も AOS 磁区形成を確認している<sup>1)</sup>。以上から、2種の副格子磁化で形成される磁気秩序の空間分布が AOS 磁 区形成に影響を及ぼすことが示唆された。

謝辞:本研究は(公財)カシオ科学振興財団の助成を受けて行った。 参考文献

H. Yoshikawa, S. El. Moussaoui, S. Terashita, R.Ueda, and A. Tsukamoto: Jpn. J. Appl. Phys., 55, 783 (2016).
 吉川大貴, Souliman El Moussaoui, 寺下進之佑, 塚本新: マグネティックス研究会, MAG-17-029 (2017).

# Si/Al 傾斜材料を用いた電流誘起垂直磁化スイッチング

高木さゆり、洞口泰輔\*、山野井一人、能崎幸雄 (慶應義塾大学、\*福岡大学)

Current-induced switching of magnetic thin films with perpendicular magnetic anisotropy

S. Takagi, T. Horaguchi\*, K. Yamanoi, Y. Nozaki

(Keio Univ. \*Fukuoka Univ.)

## <u>はじめに</u>

スピンホール効果(SHE)を示す非磁性体上に強磁性体を接合した系に対し電流を印加すると、SHE により 非磁性体中に生じたスピン流が強磁性体に注入される。このとき、強磁性体にスピントランスファートルク や接合界面に蓄積された非平衡スピンとの交換結合により強磁性体の磁化にトルクが作用し、磁化反転させ ることが可能となる。SHE はスピン軌道相互作用(SOI)を介して生じるため、従来は SOI の強い重金属を用い た研究が盛んであった。しかし最近、弱 SOI 材料からなる酸化銅や界面において、強 SOI 材料に匹敵するス ピン流が生成されることが報告され、電流誘起磁化反転を実現可能な新しいスピン流生成機構に関する研究 が進んでいる。我々は弱 SOI 材料である Si/AI 傾斜材料を用いた垂直磁化膜の電流誘起磁化反転の実証を目 指している。これまでの研究において、Si/AI 傾斜材料が Pt に匹敵するスピントルク効率を有すること、さ らに組成傾斜幅に対してスピントルク効率が極大を示すことなどを明らかにした[1]。そこで、本研究では Si/AI 傾斜材料の電流誘起磁化反転への寄与を実証するため、磁化反転の閾値電流と Si/AI 傾斜材料の組成傾 斜幅の関係を調べた。

#### <u>実験手法</u>

マグネトロンスパッタリング法を用いた交互成膜法により、熱酸化 Si 基板上に Si/Al 傾斜材料を作製した のち、その上に垂直磁気異方性を有する Pt/Co/Pt 3 層膜を成膜した。なお、Si/Al 傾斜材料の組成傾斜幅は、 界面での原子拡散を誘引するために挿入した極薄 Al/Si 膜の厚さにより制御した[1]。作製したスパッタ膜は、 フォトリソグラフフィを用いたリフトオフ法により、ホールバー状に微細加工した。Pt/Co/Pt 膜の異常ホール 効果(AHE)の測定には、面内及び面直方向に最大 2 T の静磁場を印加可能なプローバ装置を用いた。電流誘起 磁化反転の実験では、まず面直方向に磁場を印加して垂直磁化膜の磁化方向を初期化した後、面内方向に任 意の磁場を印加しながら、磁場と平行方向に電流を掃引した。異常ホール抵抗(RAHE)の磁場、及び電流依存性 を測定することにより、電流誘起磁化反転の特性を調べた。

## 実験結果および考察

Fig.1は、電流掃引に対する R<sub>AHE</sub> 値のヒステリシスループである。電流 の絶対値増加に伴い R<sub>AHE</sub> 値が飽和し、面内磁場の正負によりヒステリシス ループの向きが反転したことから、電流誘起磁化反転を実証した。ただし、 Si/Al 傾斜材料のスピントルク効率の符号から予想される面内磁場符号と ループの向きの関係が逆であった[1]。つまり、Si/Al 傾斜材料由来のスピン 流により磁化反転したのではなく、Co 層の上に成膜した Pt 層のバルク SHE によるスピン流によるトルクが支配的と考えられる。一方で、磁化反転の 閾値電流が Si/Al 傾斜材料の組成傾斜幅に依存して変化することも確認し ており、Si/Al 傾斜材料のスピン流によるトルクが磁化に作用していること が分かった。Si/Al 傾斜材料を用いた高効率な電流誘起磁化反転の実現に向 けた試みなどについて報告する。

## 参考文献

[1] 洞口ら:日本物理学会第78回年次大会



Fig. 1. SOT switching experiments for [Si/Al gradient materials] /Pt/Co/Pt films. In-plane assist fields were set a (a)  $B_x = +50$  mT, (b)  $B_x = -50$  mT.

# Si-Al 合金膜に由来するスピントルク効率の組成比依存性

中山颯人<sup>1</sup>、洞口泰輔<sup>2</sup>、山野井一人<sup>1</sup>、能崎幸雄<sup>1,3</sup> (<sup>1</sup>慶大理工、<sup>2</sup>福大理、<sup>3</sup>慶大スピン研)

Composition ratio dependence of spin torque efficiency derived from alloy films using Si and Al H. Nakayama<sup>1</sup>, T. Horaguchi<sup>2</sup>, K. Yamanoi<sup>1</sup>, Y. Nozaki<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup>Dept. of Phys., Keio Univ., <sup>2</sup>Dept. of Appl. Phys., Fukuoka Univ., <sup>1,3</sup>CSRN, Keio Univ.)

## はじめに

電子スピンの流れであるスピン流は、強磁性体内に注入されるとその磁化にトルクを与えることができる。 この現象は、超高速・低消費電力な磁気メモリの実現に向けた基盤要素として盛んに研究されてきた。従来 の高効率スピン流生成には、Pt や W、Ta などの大きなスピン軌道相互作用(SOI)を有する材料が不可欠であ った。しかし、近年、本来は SOI の小さな Cu の表面が自然酸化した材料[1]や Si と Al が膜厚方向にナノメ ートルスケールで組成傾斜した材料[2]で、高 SOI 材料に匹敵するスピン流生成が報告された。このことは、 弱 SOI 材料でも膜構造をデザインすることにより強 SOI 材料に匹敵するスピン流生成機能を持たせられるこ とを意味しており、強 SOI 材料に依存しないサステナブルなスピントロニクスデバイスの開発に向けて重要 である。本研究では、ともに軽元素である Si と Al の組成比を二種類の方法で系統的に変化させた合金膜を 作製し、そのスピントルク効率を調べたので報告する。

### 実験手法

系統的に組成比を変化させた Si-Al 合金膜を熱酸化 Si 基板上に二種類の方法で作製した。一つは、膜構造 が Sub./Si(10)/[Al( $t_{Al}$ )/Si( $t_{Si}$ )]<sub>10</sub>/Al(0.5)/Ni<sub>95</sub>Cu<sub>5</sub>(10) (単位は nm、以下同様)の交互スパッタ膜である。ここで、 ( $t_{Si}$ ,  $t_{Al}$ )は(0.25, 0.75)、(0.5, 0.5)、(0.6, 0.4)、(0.75, 0.25)、(0.87, 0.13)とした。この試料では、スパッタ粒子の 高い運動エネルギーを利用して、極薄 Si 層と Al 層を交互積層することで一様にナノ合金化させており、そ の組成比は極薄 Si、Al 層の膜厚を変化させることによって制御した。もう一つは、膜構造が Sub./Si(4.8)/ Si<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>(10)/Ni<sub>95</sub>Cu<sub>5</sub>(10)のコスパッタ膜である。ここで、x は 0.2、0.4、0.6、0.8 とした。この試料では、Si と Al を同時にスパッタすることで合金化させており、各々のレートを変化させることでその組成比を制御し

た。これら合金膜の微細構造は走査型透過電子顕微鏡で断面観 察を行うことで評価した。また、スピントルク強磁性共鳴(ST-FMR)法[3]を用いてスピントルク効率を定量化した。

#### 実験結果と展望

Fig. 1(a)は交互スパッタ膜、Fig. 1(b)はコスパッタ膜で観測された ST-FMR スペクトルである。成膜条件によって異なる形状のスペクトルが得られ、特に交互スパッタ膜のスペクトルは対称成分が大きくなった。この結果は、成膜条件により Si-Al 合金膜の微細的な構造が異なることを示唆している。本発表では、走査型透過電子顕微鏡による断面観察から評価した微細構造の違いを示し、成膜条件の違いに由来するスピントルク増大効果について詳細に議論する。

#### <u>参考文献</u>

- [1] H. An et al., Nat. Commun. 7, 13069 (2016).
- [2] T. Horaguchi *et al.*, submitted (preprint is available in: https://www.researchsquare.com/article/rs-955888/v1).
- [3] L. Liu et al., Phys. Rev. Lett. 106, 036601 (2011).



Fig. 1 ST-FMR spectra for (a) multilayered and (b) co-sputtered samples, whose compositional ratio is Si:Al = 60:40.